干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

塔里木河下游生态输水对胡杨林生态系统碳循环的影响

杨玉海[1]， 朱成刚[1]， 汪 洋[2]， 周洪华[1]
(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 新疆农业大学草业与环境科学学院，新疆 乌鲁木齐 830052)

摘 要： 2000—2020年期间向塔里木河下游的生态输水有效抬升了下游的地下水位，并对下游胡杨林生态系统的碳循环产生了重要影响。综述了生态输水对塔里木河下游胡杨林生态系统植被固碳作用可能产生的影响，分析了植被类型变化可能对胡杨林土壤有机碳含量和土壤有机碳储量产生的影响，总结了生态输水后胡杨林碳释放关键过程–土壤呼吸对生态输水的响应，解析了间歇性生态输水所致的水淹干扰对胡杨凋落叶分解的影响。综述分析表明，生态输水工程的实施对塔里木河下游荒漠河岸林生态系统的碳固定和碳释放过程均产生了作用，从而对荒漠河岸林生态系统碳循环产生了复杂的影响。总体而言，20 a的生态输水增大了塔里木河下游生态系统碳汇面积，提高了下游胡杨林生态系统植被生产力，遏制了下游胡杨林的退化，使部分裸地逐渐变为草地、林地或灌丛地，这种演变可增加土壤有机碳含量和区域土壤有机碳储量。生态输水所致的地下水位和土壤水分的变化会影响胡杨林土壤碳释放过程，其中胡杨林土壤呼吸速率与地下水位有关，而水淹干扰对胡杨凋落叶质量损失速率产生了影响。

关 键 词： 生态输水；有机碳；土壤呼吸；凋落物；塔里木河
文章编号：

作为陆地生态系统的主体，森林维持着全球73%的土壤碳库和86%的植被碳库[1]，森林生态系统碳储量的较小波动可能对大气CO_2浓度产生显著影响。我国是《联合国气候变化框架公约》缔约国之一，也是《生物多样性公约》等多个国际性公约签约国，承担着维护、改善世界生态环境的重要职责[2]。塔里木河流域分布着世界上面积最大的以胡杨为主要建群种的荒漠河岸林，它是我国西北干旱区维持生态的重要屏障。在全球气候变化叠加大强度水资源开发利用影响下，塔里木河下游河道在1972年断流，地下水位大幅下降，天然河岸林严重衰退、萎缩[3]。为挽救塔里木河下游严重退化的荒漠河岸林，2000年开始向断流30 a的塔里木河下游实施应急输水。自2000年至2020年实施的生态输水，抬升了下游地下水位、遏制了胡杨林退化趋势。国内许多学者基于野外调查、控制试验和遥感解译等方法，从不同角度研究了生态输水对塔里木河下游天然胡杨林生态系统的影响[4-10]。本文综述了生态输水对塔里木河下游胡杨林生态系统碳循环的影响，旨在揭示干旱区荒漠河岸林生态系统碳循环对生态输水的响应特征，为我国精准估算森林生态系统碳储量提供理论指导和案例参考。

1 生态输水对植被碳的影响

陆地植被通过光合作用形成光合产物来固碳，森林植被碳储量占全球植被碳储量的80.00%[1]。陆地生态系统的固碳作用可以用植被总初级生产力（Gross primary production，GPP）或植被净初级生产力（Net primary production，NPP）来表征。GPP决定了进入生态系统的初始物质和能量，是碳循环的基础，且GPP因植被类型而异，其中全球草本植被

收稿日期： 2021-02-07； **修订日期：** 2021-03-03
基金项目： 国家自然科学基金（U1803101）；科技部科技基础资源调查专项（2019FY100203）
作者简介： 杨玉海（1972-），女，副研究员，主要从事干旱区土壤生态研究. E-mail: yangyh@ms.xjb.ac.cn
通讯作者： 周洪华（1979-），女，副研究员，主要从事干旱区生态水文研究. E-mail: zhouhh@ms.xjb.ac.cn

GPP在10~25 t C·hm^{-2}·a^{-1}范围[11]。2000—2018年塔里木河陆地生态系统多年平均的生长季GPP为4198.74 g C·m^{-2}·季$^{-1}$，且生态输水20 a间生长季GPP表现出明显的增加趋势，增长幅度约为每个生长季增加90.25 g C·m^{-2}[12]。NPP是植被固定的有机碳中扣除本身呼吸消耗的部分，即用于植被生长和生殖的部分[11]。塔里木河下游以荒漠和稀疏植被为主体，生态系统碳汇以低碳汇为主要特征，自2000年生态输水至今，塔里木河下游陆地生态系统NPP呈现上升趋势，即碳汇区域有所增加，由2001年占塔里木河下游1.54%增长至2019年的7.80%，在英苏的西北、南部和台特玛湖东北增加态势较为明显[13]。20 a间塔里木河下游天然植被NPP极显著增加和显著增加的面积分别占31.93%（$P<0.01$）、11.49%（$P<0.05$），增速为0.40 g C·m^{-2}·a^{-1}；2001—2019年胡杨、柽柳、草本植物NPP多年平均值分别为29.30 g C·m^{-2}、57.37 g C·m^{-2}、23.23 g C·m^{-2}，且2019年较2001年NPP分别增长11.70 g C·m^{-2}、75.97 g C·m^{-2}、11.37 g C·m^{-2}，增幅分别为55.34%、350.20%、66.46%[14]。生态输水提升了塔里木河下游植被盖度，其中在下游上段监测断面，与2001年相比，2005年植被的总覆盖度由27.00%增加到40.66%，增加了13.66%，位于下游中段的断面，植被总覆盖度增加了8.00%~10.00%，下游下段断面仅增加了2.00%~3.00%[7]。随着输水的持续，胡杨长势逐步向好，树木年轮生长发生了良性转变，输水后一定时段内，胡杨一级枝年轮生长量随地下水埋深增加而降低，随着输水的持续进行不同地下水条件下胡杨年轮生长量逐步趋近[15]，但地下水位变化会通过对胡杨光合作用的影响[16]而使胡杨的生长量发生变化。生态输水提高了下游阿克墩监测断面草本植物的年生物量[6,17]。

植被变化（植被类型、面积、覆盖度、群落物种组成、物种多样性、个体数量等）会影响胡杨林生态系统植被碳储量及其功能。为巩固和扩大塔里木河下游植被恢复的成效，建议优化塔里木河流域水资源配置，提高流域水资源分配利用的空间均衡性，平衡农业用水和生态用水矛盾，从水资源量上满足塔里木河下游生态输水需求，从而保持并扩大下游生态系统碳汇面积及植被碳储量。

2 生态输水对土壤有机碳的影响

土壤有机碳的变化被认为是导致大气碳库和全球气候变化的主要原因[18]。土壤有机碳释放和累积是非静态的，根据土壤中有机碳输入量和输出量大小关系，土壤既可以作为碳源为大气提供CO_2，也可作为碳汇吸收大气中的CO_2[19]。在全球尺度，土壤有机碳的水平分布特征主要受气候影响，但在局地尺度，植被类型可能是影响土壤有机碳垂直分布格局的主要因素[20]。塔里木河下游以胡杨为主要建群种的荒漠河岸林土壤有机碳含量较低，下游不同地区0~60 cm土层土壤有机碳储量有差异。在剖面尺度上，不同植物群落下0~100 cm土层范围内土壤有机碳含量随土层深度的变化而存在差异，其中以芦苇为优势种的草本群落土壤有机碳含量最高，其次是柽柳灌丛群落，裸地最低[6]。不同植物群落0~100 cm土层的土壤有机碳密度各异；在植物群落类型相同的情况下，不同土层深度的土壤有机碳储量也会因植物长势、密度等不同而产生差异，且植物群落演替也会导致土壤有机碳储量发生变化[6]。当生态输水使植被向好时，下游土壤会有从风沙土-灰棕漠土-草甸土的演替过程，伴随此过程的是土壤有机碳含量增加，且塔里木河下游越靠近河道上段上层（0~50 cm）土壤有机碳含量越高[6]。

森林土壤碳库储存了占全球土壤碳库40%的碳[1]，土地利用/覆被变化是造成全球变化和碳循环不平衡的重要原因之一[19]。森林分别转化为牧场和农田5 a后，土壤有机碳含量分别减少20.00%和40.00%[20]。2010—2020年期间，塔里木河干流土地利用/覆被类型间发生了明显变化，其中从林地转换为灌丛地的面积大于灌丛地转换为林地的，林地和草地之间相互转换面积相近，林地转换为裸地的面积小于裸地转换为林地的；草地演替为灌丛地的面积大于灌丛地演替为草地的，裸地恢复为灌丛地的面积明显高于灌丛地退化为裸地的；草地转换为裸地的面积明显小于裸地转换为草地的；裸地大幅转换为灌丛地、草地和林地会增加区域土壤有机碳储量[19]。生态输水后，塔里木河下游土地利用/覆被变化总体呈现出天然植被面积增加，裸地面积减小的趋势，其中下游草地面积从2000年182.35×10^3 hm^{2}增长至2020年的190.02×10^3 hm^2，林地面积由2000年的37.25×10^3 hm^{2}增长至2020年的42.72×10^3 hm^2[21-22]。有研究表明裸地转换为草地（裸-草）或林地（裸-林）可使塔里木河下游土壤有机碳含量增加[19]，且塔里木河下游胡杨林生态系统主要植物群落的土

壤有机碳密度比裸地的高[17]，若塔里木河下游裸地恢复成草本植被区，土壤有机碳含量会显著增加从而使区域土壤有机碳储量增加。

土壤碳库及其功能与植被类型、覆盖度、土地利用等相关，区域有机碳储量锐减，不但造成土壤内在质量下降，土地生产力下降甚至丧失，且增加了向大气的碳排放，会加剧温室效应。生态输水对塔里木河下游河岸林植被产生了积极影响，下游胡杨林土壤碳储量及其功能也因植被变化而发生改变。

3 生态输水对土壤呼吸的影响

土壤呼吸是陆地生态系统净生态系统生产力(Net ecosystem production，NEP)的决定因素，微小变化会引起大气CO_2浓度改变并影响土壤碳存贮能力[23-26]。塔里木河中下游胡杨群落碳通量的变化范围分别是0.16~1.29 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$和0.09~0.39 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$，平均值分别为0.49 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$和0.19 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$；水分和温度共同调控胡杨群落土壤碳通量日变化，其中胡杨群落土壤碳通量与土壤含水量显著正相关，近地表气温是决定土壤碳通量的重要因子，但在干旱条件下土壤呼吸对温度的敏感性受土壤水分状况的影响[24]。土壤呼吸速率是土壤碳释放的最主要部分，占土壤碳损失量的60.00%~90.00%左右[25-26]。土壤呼吸速率由根系有机碳积累和微生物的分解、释放共同决定。在塔里木河中下游，胡杨林土壤呼吸速率空间差异性表现明显，沿河道方向上，中游胡杨林平均土壤呼吸速率是下游的2.6倍；垂直于河道方向上，随距离河道越远土壤呼吸速率逐渐减小，胡杨幼苗土壤呼吸与土壤水分有极显著相关性；在−1.50~−4.64 m地下水位范围内，胡杨土壤呼吸速率随地下水位加深而减小，地下水位变化能够反映76.00%左右土壤呼吸速率变化；但在−5.32~−9.07 m地下水位范围内土壤呼吸速率受地下水变化的影响很微弱[25]。在森林生态系统中，凋落物和根系碳输入在很大程度上影响着土壤CO_2通量[27]，而胡杨土壤呼吸速率的大小在很大程度上也由胡杨积累的生物量决定[26]，但是凋落物尤其是凋落叶对胡杨林土壤呼吸的影响则尚不清楚。土壤呼吸与土壤微生物有密切关系，塔里木河下游胡杨林地0~30 cm土层中微生物数量较少，尤其是真菌和放线菌，在地下水位埋深较浅时，土壤细菌更易于保持其活性[6]。在极端干旱条件下，塔里木河下游地下水位越深，荒漠河岸林土壤碳素释放速率越慢，地表植被盖度越低，土壤碳释放速率越小；下游生态输水工程有助于区域碳源/汇功能的稳定[23]。

4 生态输水对凋落物的影响

植物生长形成的有机碳，大部分以凋落物形式进入地表或成为土壤有机质的一部分(从较长的时间尺度看，它们又通过土壤呼吸而释放到大气中)，另一部分构成植物的生物量[11]。凋落物输入和降解速率决定了土壤可溶性有机碳的产量，也影响着CO_2通量[27-28]。作为森林生态系统碳循环十分重要的一个部分，凋落叶在森林生态系统物质循环和能量流动过程中发挥着不可替代的作用[28-30]。塔里木河下游在地下水埋深为5~6 m情况下，胡杨细根($D\leq 2$ mm)主要分布在60~1200 cm土层之内[31]。胡杨地上部分不同器官平均含碳率从大到小依次为：树干(48.17%)>树枝(47.75%)>树皮(46.13%)>树叶(44.90%)[32]。塔里木河流域胡杨林地上生物量及碳储量因植株树龄、长势等不同而存在很大差异[33]，而塔里木河下游单株胡杨年凋落叶量平均值为13.40 kg·株$^{-1}$(2.05~40.70 kg·株$^{-1}$)。

与土壤相比，森林凋落物中易变碳的含量更丰富，凋落物中的碳更易被分解，凋落物中碳的周转时间更短，森林凋落物碳归还对气候变暖、CO_2浓度上升、人类干扰及矿质土壤基质的可用性等变化的响应亦更为敏感[34]。新鲜凋落叶分解过程中只有20%的碳留存在土壤有机质中，80%的碳将损失掉[35]。生态输水使塔里木河下游河道在近20 a里处于间歇性过水状态，部分生长在河岸低洼地的植物可能会在输水期间受到漫溢干扰[36]。野外凋落叶分解试验结果表明：水淹干扰可促进胡杨凋落叶的分解。与自然状态下未被水淹的凋落叶相比，遭受一次短时水淹(5 h)后胡杨叶片质量损失速率及损失发生时期均会发生改变[37]。其中，在640 d的分解中，自然状态下胡杨叶片质量变化可分为5个时间段，其中0~173 d是叶片质量保持阶段，173~290 d是质量明显下降阶段，290~470 d是质量保持不变阶段，470~560 d是质量明显下降阶段，560~640 d是质量

保持不变阶段。遭受一次持续时间约5 h的水淹干扰后,胡杨叶片质量在640 d的分解时间内也呈现5个变化时间段,其中0~173 d是叶片质量发生微小损失阶段,173~290 d是质量快速下降阶段,290~380 d是质量发生微小损失阶段,380~560 d是质量保持阶段,560~640 d是质量明显变化阶段,但是短时水淹干扰凋落叶分解过程的作用尚未明确解析和量化[37]。在塔里木河下游,干旱、少雨和微生物数量少等多因素共同影响下,下游胡杨凋落叶的分解缓慢,致使许多胡杨树下积累了大量未被分解的凋落叶,这不仅不利于胡杨林生态系统养分循环和能量流动,也存在一定的安全隐患。若在生态输水时通过人为调控加大河水漫溢范围,将会促进荒漠河岸林植被恢复和凋落叶分解,加速荒漠河岸林生态系统物质循环和能量流动。

5 结 语

河岸林是复杂而重要的生态系统,它支撑着许多临界环境的变化过程,如养分循环、洪峰消减、岸线稳定、地下水交换和水质改善等,同时,河岸林也是动、植物主要栖息地,对维护生物的多样性具有重要作用。塔里木河地处我国西北干旱区,流域内以胡杨为主要建群种的荒漠河岸林对维护调控干旱荒漠地区脆弱的生态系统平衡起着十分重要的作用,具有很高的生态、经济和社会效益。自2000年开始实施的包括生态输水工程在内的综合治理措施,大尺度上修复了塔里木河下游退化天然胡杨林,同时也对胡杨林生态系统碳固定和碳释放产生了复杂的影响。但是,有关生态输水与胡杨林生态系统碳循环的这些研究,因研究尺度和对象的差异性,使得这些研究结果之间的可比性较弱,而且胡杨林生态系统的碳固定和碳释放过程之间存在较为复杂的关联,但是已有研究多聚焦于研究单一过程对生态输水的响应,且多是量化生态输水后这2个过程发生变化后的结果,如有关GPP或NPP以及土壤有机碳储量的研究,但是解析这些变化发生原因及作用机理的研究相对较少,未来若能从长时间尺度定位监测研究生态输水过程中土壤微生物活性、区系等特性的变化,将有助于揭示胡杨林生态系统土壤呼吸作用、凋落物分解以及植物光合作用等碳循环相关过程变化的原因及作用机理。干旱区荒漠河岸林生态系统碳循环的变化可能对区域乃至全球气候变化产生深远影响。因此,在水资源有限的背景下,通过生态输水工程来保育恢复塔里木河下游荒漠河岸林的意义重大且任重道远。

参考文献(References)

[1] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. Science, 1994, 263: 185–190.

[2] 王群, 范俊荣. 森林碳汇机制下保护生物多样性的规制问题探讨[J]. 林业科学, 2013, 49(9): 148–152. [Wang Qun, Fan Junrong. Discussion of biodiversity protection regulation problems under the forest carbon sequestration mechanism[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(9): 148–152.]

[3] 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏, 等. 荒漠河岸林建群植物的水分利用过程分析[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 130–136. [Chen Yaning, Li Weihong, Chen Yapeng, et al. Water use process of constructive plants in desert riparian forest[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 130–136.]

[4] 张经天, 席海洋. 荒漠河岸林地下水位时空动态及其对地表径流的响应[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 388–398. [Zhang Jingtian, Xi Haiyang. Spatiotemporal dynamics of groundwater levels in a desert riparian forest and its response to surface runoff[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 388–398.]

[5] 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏, 等. 科技支撑新疆塔里木河流域生态修复及可持续管理[J]. 干旱区地理, 2018, 41(5): 901–907. [Chen Yaning, Li Weihong, Chen Yapeng, et al. Science in supporting the ecological restoration and sustainable development of the Tarim River Basin[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(5): 901–907.]

[6] 杨玉海. 塔里木河中下游土壤生态系统特性及其对生态恢复的响应[D]. 乌鲁木齐: 中国科学院新疆生态与地理研究所, 2008. [Yang Yuhai. Characteristics of soil ecosystem in the middle and lower reaches of Tarim River and its response to ecological restoration[D]. Urumqi: Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, 2008.]

[7] 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏, 等. 新疆塔里木河下游断流河道输水与生态恢复[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 538–545. [Chen Yaning, Li Weihong, Chen Yapeng, et al. Water conveyance in dried-up riverway and ecological restoration in the lower reaches of Tarim River, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(2): 538–545.]

[8] 王建刚, 李霞, 石瑞花, 等. 塔里木河下游胡杨对输水的生态响应[J]. 自然资源学报, 2008, 23(4): 619–625. [Wang Jiangang, Li Xia, Shi Ruihua, et al. Ecological responses of *Populus euphratica* to water supply in the lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(4): 619–625.]

[9] 史浩伯, 孙桂丽, 陈亚宁, 等. 基于生态位分化的塔里木河下游植物种群分布格局与共存机制[J]. 西部林业科学, 2019, 48(6): 114–120. [Shi Haobo, Sun Guili, Chen Yaning, et al. Plant populations in the lower reaches of the Tarim River based on niche differentiated distribution pattern and coexistence mechanism[J]. Journal of West China Forestry Science, 2019, 48(6): 114–120.]

[10] 徐俏, 叶茂, 徐海量, 等. 塔里木河下游生态输水对植物群落组成、多样性和稳定性的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(9): 2603–2610. [Xu Qiao, Ye Mao, Xu Hailiang, et al. Effects of ecological water conveyance on the composition diversity and stability of

plant community in the lower reaches of Tarim River[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(9): 2603-2610.]

[11] 方精云, 柯金虎, 唐志尧, 等. 生物生产力的"4P"概念、估算及其相互关系[J]. 植物生态学报, 2001, 25(4): 414-419. [Fang Jingyun, Ke Jinhu, Tang Zhiyao, et al. Implications and estimations of four terrestrial productivity parameters[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2001, 25(4): 414-419.]

[12] 张雪琪, 夏倩倩, 陈亚宁, 等. 近20年塔里木河生态输水对植被总初级生产力变化的影响[J/OL]. 干旱区地理. [2021-02-25]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.x.20210328.1825.006.html. [Zhang Xueqi, Xia Qianqian, Chen Yaning, et al. Effect of ecological water transport on gross primary productivity of vegetation in Tarim River in recent 20 years[J/OL]. Arid Land Geography. [2021-02-25]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.x.20210328.1825.006.html.]

[13] 王川, 刘永昌, 李稚. 塔里木河下游生态输水对生态系统碳源/汇空间格局的影响分析[J/OL]. 干旱区地理. [2021-02-25]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.x.20210407.1322.006.html. [Wang Chuan, Liu Yongchang, Li Zhi. Analysis on the impact of ecological water transportation on the spatial pattern of ecosystem carbon sources/sinks in the lower Tarim River[J/OL]. Arid Land Geography. [2021-02-25]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.x.20210407.1322.006.html.]

[14] 张静静, 郝兴明, 郝海超, 等. 塔里木河下游生态输水对天然植被NPP的影响[J/OL]. 干旱区地理. [2021-02-25]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20210408.1044.002.html. [Zhang Jingjing, Hao Xingming, Hao Haichao, et al. Effects of ecological water transport on NPP of natural vegetation in the lower reaches of Tarim River[J/OL]. Arid Land Geography. [2021-02-25]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20210408. 1044.002.html.]

[15] 牛婷, 李霞, 张绘芳, 等. 胡杨对非确定性输水响应的生态表征[J]. 资源科学, 2012, 34(5): 819-826. [Niu Ting, Li Xia, Zhang Huifang, et al. Ecological characterization of *Populus euphratica*' s response to non-deterministic water delivery[J]. Resources Science, 2012, 34(5): 819-826.]

[16] 周洪华, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河下游胡杨气体交换特性及其环境介绍[J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 665-672. [Zhou Honghua, Chen Yaning, Li Weihong, et al. Characterization of photosynthesis of *Populus euphratica* Oliv and its microclimate explanation in lower Tarim River[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(4): 665-672.]

[17] 杨玉海, 李卫红, 李慧敏, 等. 塔里木河下游退化生态系统恢复对土壤有机碳的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 855-858. [Yang Yuhai, Li Weihong, Li Huimin, et al. Impacts of degraded ecological system restoration on soil organic carbon in inland basin of Tarim River[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(4): 855-858.]

[18] Batlle-Bayer L, Batjess N H, Bindraban P S. Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: A review[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2010, 137 (1-2): 47-58.

[19] 杨玉海, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河干流土地利用/覆被变化对土壤有机碳储量的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(9): 2784-2790. [Yang Yuhai, Chen Yaning, Li Weihong, et al. Effects of land use/cover change on soil organic carbon storage in the main stream of Tarim River[J]. China Environmental Science, 2016, 36(9): 2784-2790.]

[20] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105. [Zhou Li, Li Baoguo, Zhou Guangsheng. Advance in controlling factors of soil organic carbon[J]. Advance in Earth Science, 2005, 20(1): 99-105.]

[21] 张帅, 汪洋, 夏婷婷, 等. 塔里木河下游生态系统服务价值对生态输水过程的响应[J/OL]. 干旱区地理. [2021-02-25]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20210421.1011.002.html. [Zhang Shuai, Wang Yang, Xia Tingting, et al. Response of ecosystem service value to the process of ecological water transport in the lower Tarim Rive[J/OL]. Arid Land Geography. [2021-02-25]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X. 20210421.1011.002.html.]

[22] Wang Y, Zhang S, Zhen H, et al. Spatiotemporal evolution characteristics in ecosystem service values based on land use/cover change in the Tarim River Basin, China[J]. Sustainability, 2020, 12 (18): 1-16.

[23] 黄湘. 塔里木河下游河道断流对土壤碳释放的影响[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(5): 133-137. [Huang Xiang. Effect of river channel drying on soil carbon release in the lower reaches of Tarim River[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41 (5): 133-137.]

[24] 黄湘, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河中下游胡杨群落土壤碳通量日变化研究[J]. 自然科学进展, 2006, 16(11): 1405-1410. [Huang Xiang, Chen Yaning, Li Weihong, et al. Daily variation of soil carbon flux in soils of *Populus euphratica* community in the middle and lower reaches of the Tarim River[J]. Progress in Nature Science, 2006, 16(11): 1405-1410.]

[25] Huang X, Chen Y N, Ma J X. et al. Special variation of soil respiration and its effecting factors in temperate deserts, China[J]. Procedia Environmental Science, 2011(10): 228-238

[26] 黄湘, 李卫红, 马建新, 等. 通过改变光热条件分析胡杨群落光合作用对土壤呼吸速率的影响[J]. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1167-1173. [Huang Xiang, Li Weihong, Ma Jianxin, et al. Influence of photosynthesis on soil respiration rates for *Populus euphratica* in different light conditions in arid environments[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(5): 1167-1173.]

[27] Trumbore S E, Czimczik C I. An uncertain future for soil carbon [J]. Science, 2008, 321(5895): 1455-1456.

[28] Chambers J, Higuchi N, Tribuzy E, et al. Carbon sink for a century [J]. Nature, 2001, 410: 429.

[29] Sayer E J. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems[J]. Biological Reviews, 2006, 81(1): 1-31.

[30] Berg B, Mcclaugherty C. Plant litter: Decomposition, humus formation, carbon sequestration[M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 2008: 254.

[31] 木巴热克·阿尤普, 陈亚宁, 李卫红, 等. 极端干旱环境下的胡杨细根分布与土壤特征[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1450-1458. [Mubareke Ayoupu, Chen Yaning, Li Weihong, et al. Fine root distribution of *Populus euphratica* Oliv. and its relations with soil factors under extremely arid environment[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(6): 1450-1458.]

[32] 顾芳. 塔里木河干流胡杨林空间分布变化研究[J]. 地理空间信息, 2020, 18(9): 48-51. [Gu Fang. Research on the spatial distribution variation of the *Populus euphratica* in the mainstream of Tarim River[J]. Geospatial Information, 2020, 18(9): 48-51.]

[33] 刘茂秀, 史军辉, 王新英, 等. 塔河流域天然胡杨林不同林龄地上生物量及碳储量[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 326-329.

[Liu Maoxiu, Shi Junhui, Wang Xinying, et al. Aboveground biomass and carbon storage of *Populus euphratica* plantation with different ages in Tahe River Basin[J]. Bulletion of Soil and Water Conservation, 2016, 36(5): 326−329.]
[34] Borken W, Davidson E A, Savage K, et al. Drying and wetting effects on carbon dioxide release from organic horizons[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(6): 1888−1896.
[35] Ngao J, Epron D, Brechet C, et al. Estimating the contribution of leaf litter decomposition to soil CO_2 efflux in a beech forest using ^{13}C-depleted litter[J]. Global Change Biology, 2005, 11: 1768−1776.
[36] 赵振勇, 张科, 卢磊, 等. 塔里木河中游洪水漫溢区荒漠河岸林实生苗更新[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3322−3329. [Zhao Zhenyong, Zhang Ke, Lu Lei, et al. Seedling recruitment in desert riparian forest following river flooding in the middle reaches of the Tarim River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(12): 3322−3329.]
[37] Yang Y H, Zhou H H, Ye Z X, et al. Effects of transient flooding on leaf litter decomposition: A case study of *Populus euphratica* Oliv. leaf in an arid area[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2019, 22(6): 1386−1392.

Effects of ecological water conveyance on carbon cycle of *Populus euphratica* forest ecosystem in the lower reaches of Tarim River

YANG Yuhai[1], ZHU Chenggang[1], WANG Yang[2], ZHOU Honghua[1]

(1. Key Laboratory of Oasis Ecology and Desert Environment, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. College of Pratacultural and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract: Desert riparian forests are an important vegetation type for inland river valleys in the arid region of northwest China. In the lower reaches of Tarim River, natural *Populus euphratica* forest ecosystems are dependent on streamflow. Streamflow in the lower reaches (at 321 km) completely ceased since 1972. The soil has been seriously desertified, and plants have seriously degenerated in the region. A series of environmental measures have been taken to restore the natural *P. euphratica* forest in the lower reaches of Tarim River, including an ecological water conveyance project. In this paper, on the basis of the results of many studies in the last 20 years, the effects of ecological water conveyance on the carbon cycle of natural *P. euphratica* forest ecosystems in the lower reaches of Tarim River were comprehensively reviewed. The possible effects of ecological water conveyance on carbon sequestration of *P. euphratica* forest ecosystems were reviewed, and the effects of vegetation type changes on soil organic carbon content and regional soil organic carbon storage in the lower reaches of Tarim River were analyzed. In addition, the rates of soil respiration and *P. euphratica* leaf litter decomposition of the *P. euphratica* forest were reviewed. The implementation of ecological water conveyance affected the carbon cycle of the *P. euphratica* forest in the lower reaches of Tarim River. Overall, with the implementation of the ecological water conveyance, the carbon sink area and vegetation productivity of the *P. euphratica* forest increased from 2001 to 2019. The ecological water conveyance restrained vegetation degradation, and some bare land gradually changed into grassland, woodland, or shrubland, which could increase soil organic carbon content and regional soil organic carbon storage in the lower reaches of Tarim River. The groundwater level and soil moisture were affected by the ecological water conveyance in the lower reaches of Tarim River. The soil respiration rate of the *P. euphratica* forest was related to the groundwater level, and the mass loss rates of *P. euphratica* leaf litter were affected by moisture during decomposition in the lower reaches of Tarim River. Carbon cycle changes in desert riparian forest ecosystems in arid areas may have a profound influence on regional and even global climate change. Therefore, under the background of limited water resources, conserving and restoring the desert riparian forest in the lower reaches of Tarim River through an ecological water conveyance project is of great significance.

Key words: ecological water conveyance; soil organic carbon; soil respiration; litter; Tarim River